Nota

Detección de Sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada

• Daniel Francisco Campos-Aranda •
Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
*Autor de correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10

Resumen

Campos-Aranda, D. F. (enero-febrero, 2018). Detección de sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *9*(1), 135-149, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10.

Las *sequías meteorológicas* (*SM*) son un decremento temporal en la precipitación normal que recibe una localidad o región. Para formular planes de mitigación de sus daños, es necesario estudiarlas para estimar sus características. En este trabajo se detecta la ocurrencia de las *SM* anuales y se estima su severidad a través del *índice de sequías de Pedj* (*ISP*), que se define como la diferencia entre las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales. Se calcularon 16 series del *ISP*, en el estado de Zacatecas, México, cuyo periodo común fue de 65 años en el lapso de 1950 a 2014. Después de verificar su homogeneidad, tales series se analizaron con varios métodos estadísticos, para establecer su comportamiento local y regional. A nivel local se detectan y analizan las secuencias más severas de cinco años, así como las diez sequías más extremas. El análisis regional buscó los años con sequía que afectaron un mayor número de estaciones climatológicas, en cada una de las tres zonas geográficas analizadas. Como el *ISP* data de mediados de los años setenta se contrastó con un índice reciente, el RDI_{ST}. De todos los análisis realizados se concluye que el *ISP* es una técnica simple que permite la detección precisa a nivel local y regional de las *SM* anuales; por ello se recomienda su aplicación sistemática. Además, permitirá verificar los resultados de otros índices de sequías y hará posible conocer las *SM* como serie cronológica, orientado esto último a su pronóstico.

Palabras clave: desviación estándar, índice de anomalía estandarizada, índice de sequías de Pedj, pruebas estadísticas, promedios móviles, sequías importantes.

Abstract

Campos-Aranda, D. F. (January-February, 2018). Detection of annual meteorological Droughts in the state of Zacatecas, Mexico, based on standardized anomaly indices. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 9(1), 135-149, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10.*

Meteorological droughts (MD) are a temporary decrease in the normal rainfall received by a location or a region. In order to formulate plans for mitigation of damages, it becomes necessary to study the droughts to estimate related features. In this work the occurrence of annual MD is detected and its severity is estimated through the Pedj drought index (PDI), defined as the difference between the standardized anomalies of the mean temperature and of precipitation, both annual estimates. Sixteen PDI series were calculated, in the state of Zacatecas, Mexico, whose common period was 65 years in the lapse from 1950 to 2014. After verifying their homogeneity, such series were analyzed with various statistical methods, to establish their local and regional behavior. At the local level the most severe sequences of five years are detected and analyzed, as well as the ten most extreme droughts. The regional analysis helped finding the drought years that affected a large number of climatological stations, in each of the three geographical areas analyzed. As the PDI dates from mid-seventies was contrasted with a recent index, the RDI_{ST}. Based on all analyzes, it is concluded that the PDI is a simple technique that allows the accurate detection at local and regional level of annual MD; therefore its systematic application is recommended. This implementation will allow the verification of results of other indices of drought and make it possible to know the MD as time series, the latter oriented to forecasting.

***Keywords**: Standard deviation, standardized anomaly index, Pedj drought index, statistical tests, moving averages, major droughts.*

Recibido: 12/10/2015
Aceptado: 09/01/2017

Introducción

Los fenómenos anormales y extremos del tiempo atmosférico y del clima de un lugar, como son las crecientes y sequías, así como sus particularidades asociadas, tormentas y ondas de calor, por lo general tienen efectos perjudiciales en la sociedad y su infraestructura, en los ecosistemas y vida silvestre (Kunkel, Pielke, & Changnon, 1999).

Respecto a las *sequías*, una definición general establece que es un *decremento en la disponibilidad de agua*, la cual está caracterizada por tres aspectos cruciales: duración, severidad y área abarcada. Este concepto de sequía involucra dos tipos de evaluadores de la *deficiencia de agua*, el primero asociado con los efectos directos de los elementos del ciclo hidrológico, como precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimiento en ríos, etc.; el segundo son los indicadores de los recursos hídricos, los cuales estiman la severidad en términos de los impactos en los usos del agua, como abastecimiento urbano, industrial, agrícola y ecológico (Mawdsley, Petts, & Walker, 1994).

Por otra parte, los *índices de sequías*, por lo común pueden reflejar las condiciones de sequía con base en las variables hidroclimáticas, pero no son capaces de cuantificar los daños económicos. Sin embargo, los índices que cuantifican la variabilidad climática son útiles para detección de sequías, su seguimiento y estimación indirecta de sus impactos, todo lo cual permite elaborar planes de prevención y contingencia contra tales eventos (Mishra & Singh, 2010; Lobato-Sánchez, 2016).

El objetivo de este estudio consiste en describir con detalle el *índice de sequías de Pedj* (*ISP*), el cual se define por la diferencia entre las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales. Para 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México, se procesaron sus registros comunes de 65 años en el periodo de 1950 a 2014, para obtener sus series del *ISP*, las cuales se analizaron estadísticamente, a fin de verificar su homogeneidad y obtener las características fundamentales de las sequías anuales en el ámbito local y en las tres zonas geográficas del estado.

Métodos y materiales

Índices de monitoreo de la variabilidad climática

Las mediciones de precipitación y temperatura son las más abundantes tanto temporal como espacialmente, por ello estos datos han sido utilizados de forma individual o conjunta para caracterizar el clima de una región o territorio. Además, la correlación, usualmente negativa, entre temperatura y precipitación ha sido verificada por diversos autores; es decir, que periodos secos son por lo general lapsos calurosos y viceversa. Por otra parte, la variabilidad anual de los registros o series de precipitación y temperatura media se puede detectar a través de sus *índices de anomalía estandarizada* (*IAE*), definidos (Elagib & Elhag, 2011) como:

$$IAE_{PA} = \frac{PA - PMA}{DEP} \tag{1}$$

y:

$$IAE_{TM} = \frac{TM - TMA}{DET} \tag{2}$$

siendo *PA* la precipitación anual en milímetros; *PMA*, su valor medio, y *DEP* su desviación estándar no sesgada; se estima con la ecuación (3). *TM* es el valor anual de la temperatura media en °C; *TMA*, su valor promedio y *DET* es su desviación estándar no sesgada; se evalúa con la ecuación (4):

$$DEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(PA_i - PMA\right)^2}{\left(n-1\right)}} \tag{3}$$

$$DET = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(TM_i - TMA\right)^2}{\left(n-1\right)}} \tag{4}$$

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 135-149

• ISSN 0187-8336

en las expresiones anteriores, *n* es el número de años del registro o serie procesada.

Índice para detección de sequías

Pedj propuso en 1975, en Rusia, un índice para detección de sequías anuales, definido por la diferencia entre los *IAE* de la temperatura media menos el de la precipitación (Elagib & Elhag, 2011), esto es:

$$ISP = IAE_{TM} - IAE_{PA} \tag{5}$$

ISP es el *Índice de Sequías de Pedj*, cuyo valor anual clasifica al tiempo atmosférico como húmedo o de sequía según el cuadro 1. Elagib y Elhag (2011) verificaron empíricamente la ecuación (5), encontrando que el *ISP* tiene correlación negativa con la anomalía de la precipitación y varía de modo directo con la anomalía de la temperatura media; lo más importante es que captura ambas direcciones o tendencias. Este índice ha sido utilizado por varios autores en trabajos de caracterización territorial alrededor del mundo, como Gruza, Rankova, Razuvaev y Bulygina (1999), Qian y Zhu (2001), y Potop y Soukup (2009).

Índice de reconocimiento de sequías

Designado RDI de *Reconnaissance Drought Index* es quizás el índice más simple que se ha propuesto de manera reciente (Tsakiris & Vangelis, 2005; Tsakiris, Tigkas, Vangelis, & Pangalou, 2007; Campos-Aranda, 2014). Se calcula inicialmente como el cociente (a_i) entre la precipitación mensual acumulada y la respectiva evapotranspiración potencial (*ETP*), en los *k* meses considerados como *duración de la sequía* de cada año *i* del registro procesado. Cuando *k* = 12 en el lapso de enero a diciembre el RDI es un índice anual, esto es:

$$a_i = \frac{PA_i}{ETP_i} \tag{6}$$

Ya que las magnitudes de a_i pueden ser representadas probabilísticamente por la distribución log-normal, los valores estandarizados del RDI se obtienen fácilmente con la ecuación:

$$RDI_{st}^{i} = \frac{y_i - \overline{y}}{\sigma_y} \tag{7}$$

en la cual:

$$y_i = \ln(a_i) \tag{8}$$

En la ecuación (7), $\overline{y}$ es la media aritmética y σ_y es la desviación estándar de los valores y_i. Los valores positivos del RDI_{st} indican años húmedos y los negativos son *sequías anuales*, con la severidad siguiente: leves hasta -1.00; moderadas, fluctuando de -1.00 a -1.50; severas, variando de -1.50 a -2.00; y por último, extremas, menores que -2.00.

Para estimar la evapotranspiración potencial anual (ETP_i) en milímetros de la ecuación (6) se puede utilizar el método de Hargreaves-Samani, que está basado exclusivamente en la temperatura media (TM_i) anual expresada en grados Fahrenheit y en la radiación solar incidente media diaria (Rs_i^l) anual expresada en milímetros de lámina de agua evaporada (*l*). Su fórmula es (Hargreaves & Samani, 1982; Campos-Aranda, 2005):

$$ETP_i = 2.7375 \cdot Rs_i^l \cdot (1.8 \cdot TM_i + 32) \tag{9}$$

Cuadro 1. Clasificación de los años como húmedos o de sequía, según el valor del *ISP*, (Potop & Soukup, 2009; Elagib & Elhag, 2011).

Intervalo del *ISP*	Tipo o categoría	Abreviatura	Intervalo del *ISP*	Tipo o categoría	Abreviatura
$-1 \le ISP < 0$	Húmedo leve	HL	$0 < ISP < 1$	Sequía leve	SL
$-2 \le ISP < -1$	Húmedo moderado	HM	$1 \le ISP < 2$	Sequía moderada	SM
$-3 \le ISP < -2$	Húmedo severo	HS	$2 \le ISP < 3$	Sequía severa	SS
$ISP < -3$	Húmedo extremo	HE	$ISP \ge 3$	Sequía extrema	SE

ISSN 0187-8336 •

La radiación solar incidente (Rs_i) *promedio* se obtuvo del mapa anual para la república mexicana expuesto por Almanza y López (1975), cuyo valor para la ciudad de Zacatecas es de 495 cal/cm^2/d. Para la transformación de Rs_i a lámina de agua evaporada por día se emplea la fórmula siguiente:

$$Rs_i^l = \frac{10 \cdot Rs_i}{Hv_i} \tag{10}$$

en la cual Hv_i es el llamado calor latente de evaporación o energía necesaria en calorías para evaporar 1 g o un cm^3 de agua; se estima con la expresión siguiente, estando la temperatura media (TM_i) anual en °C:

$$Hv_i = 595.9 - 0.55 \cdot TM_i \tag{11}$$

Registros climáticos anuales utilizados

En el estudio realizado por Campos-Aranda (2015) a la precipitación anual del estado de Zacatecas, México, se observó que 16 estaciones pluviométricas podían seleccionarse con un *periodo común* máximo de 63 años, en el lapso de 1950 a 2012. Tales datos fueron ampliados hasta el año de 2014, con base en la información proporcionada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Siguiendo un procedimiento idéntico al descrito para la precipitación en la referencia citada, se integraron los 16 registros anuales correspondientes de temperatura media en el periodo común de 65 años (1950-2014). Las características generales de estas 16 estaciones climatológicas que serán procesadas se citan en el cuadro 2, expuestas por zonas geográficas y en orden progresivo de *PMA*. En la figura 1 se muestra su ubicación dentro del estado de Zacatecas.

Resultados y discusión

Cálculo de las series del *Índice de Sequías de Pedj*

Aplicando las ecuaciones (1) a (5) en los 16 registros anuales que serán procesados de

Cuadro 2. Datos generales de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Nombre estación (núm. del AC[1])	Latitud N	Long. WG	Altitud ([2])	RH[3]	Zona	*PMA* (mm)	*DEP* (mm)	*TMA* (°C)	*DET* (°C)	*ISP*[4]	
											Mín	Máx
1	Cañitas de Felipe Pescador (9)	23° 36′	102° 44′	2025	37	Norte	371.3	132.52	16.02	1.057	-3.415	3.460
2	Río Grande (73)	23° 48′	103° 02′	1890	36	Norte	384.7	128.36	16.92	0.481	-3.452	3.845
3	Fresnillo (30)	23° 11′	102° 53′	2195	37	Norte	415.9	125.59	16.91	1.136	-4.309	4.003
4	Leobardo Reynoso (El Sauz) (25)	23° 11′	103° 12′	2090	36	Norte	418.3	121.79	16.08	0.471	-4.433	2.648
5	Villa de Cos (98)	23° 17′	102° 21′	2050	37	Norte	426.4	165.01	17.51	0.658	-5.111	4.331
6	Santa Rosa (69)	22° 56′	103° 07′	2240	36	Norte	459.3	149.28	14.75	0.545	-3.981	2.730
7	San Pedro Piedra Gorda (83)	22° 27′	102° 21′	2032	12	Centro	411.5	135.24	16.85	0.828	-3.611	2.793
8	Villa García (99)	22° 10′	101° 57′	2102	12	Centro	443.3	126.41	16.33	0.813	-3.235	2.634
9	Pinos (65)	22° 17′	101° 35′	2408	37	Centro	448.3	151.37	16.29	1.026	-4.107	3.503
10	Zacatecas (103)	22° 46′	102° 35′	2485	37	Centro	463.2	133.21	15.70	0.598	-3.280	3.084
11	Villanueva (102)	22° 22′	102° 53′	1920	12	Centro	470.9	145.91	16.89	0.575	-3.048	3.230
12	Presa El Chique (68)	22° 00′	102° 53′	1620	12	Sur	543.6	117.21	20.92	0.884	-3.259	3.873
13	Juchipila (42)	21° 23′	103° 07′	1270	12	Sur	691.7	143.39	21.72	1.483	-3.297	3.242
14	Nochistlán (58)	21° 22′	102° 51′	1850	12	Sur	700.2	162.05	18.61	0.721	-4.527	3.412
15	Tlaltenango (94)	21° 47′	103° 18′	1700	12	Sur	701.5	157.22	18.05	1.176	-4.411	2.615
16	Excamé (27)	21° 39′	103° 20′	1740	12	Sur	736.5	154.47	18.53	0.493	-3.662	3.330

[1] Archivo de Conagua; [2] metros sobre el nivel del mar; [3] región hidrológica; [4] índice de sequías de Pedj.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 135-149

• ISSN 0187-8336

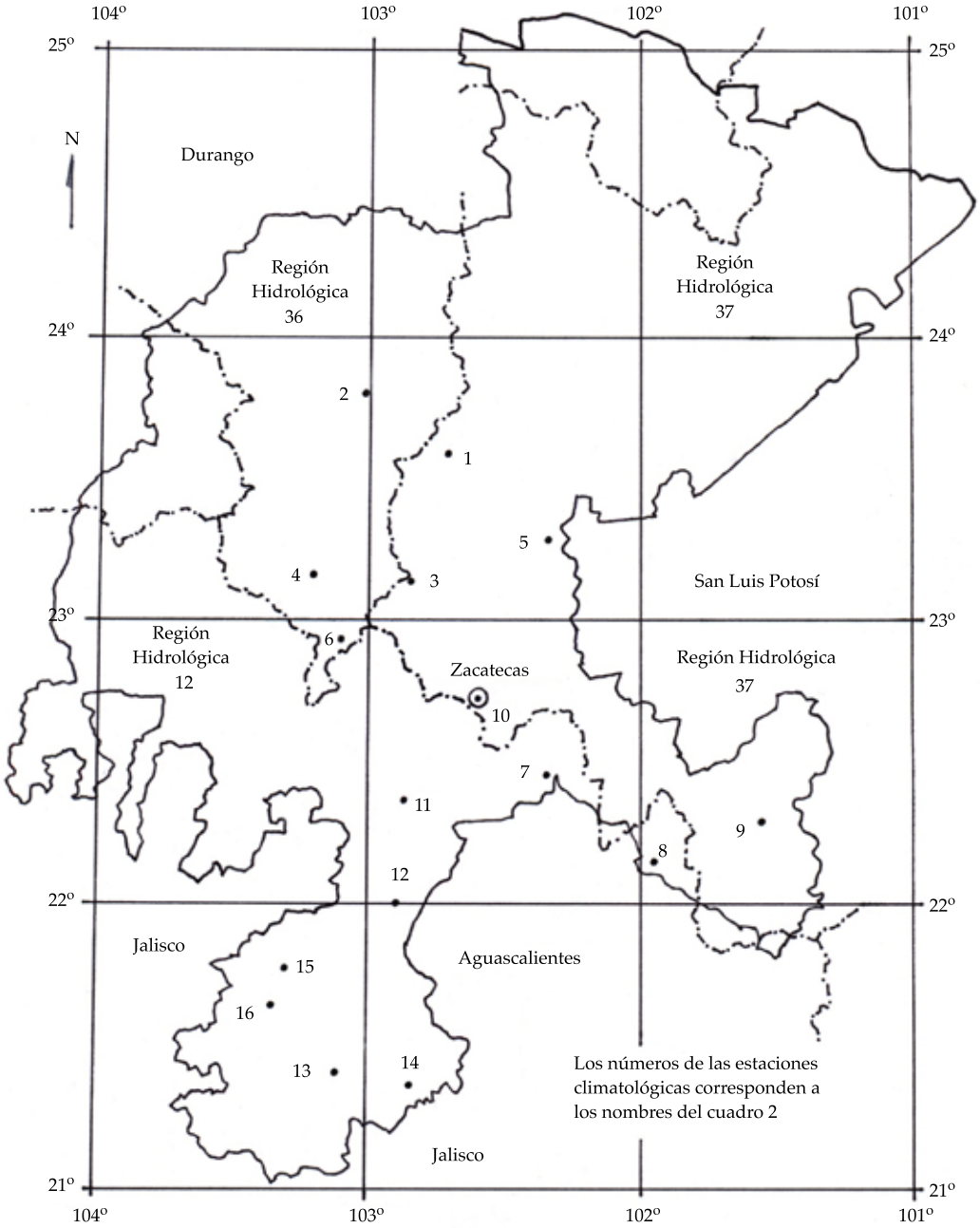

Figura 1. Localización geográfica de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

precipitación y temperatura media se obtienen las series del *índice de sequías de Pedj* (*ISP*), cuyos valores extremos se citan en el cuadro 2. En el cuadro 3 se exponen los datos y resultados anuales para cada una de las estaciones climatológicas consideradas representativas de las tres zonas geográficas definidas, las cuales fueron Leobardo Reynoso, Zacatecas y Nochistlán; la primera y la última tienen registros homogéneos, según resultados del cuadro 4 del inciso siguiente, y Zacatecas sólo tiene persistencia, es la capital del estado.

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 3. Datos y cálculos anuales de sequías con base en el *ISP* en las tres estaciones climatológicas indicadas del estado de Zacatecas, México.

Valores de		Leobardo Reynoso (El Sauz)				Zacatecas				Nochistlán			
PMA	*DEP*	418.334 mm		121.793 mm		463.220 mm		133.206 mm		700.160 mm		162.052 mm	
TMA	*DET*	16.083 °C		0.471 °C		15.703 °C		0.598 °C		18.608 °C		0.721 °C	
Núm.	**Año**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**
1	1950	397.3	16.7	1.484	SM	396.7	16.6	1.998	SM	654.9	18.9	0.684	SL
2	1951	431.6	16.7	1.202	SM	437.6	16.3	1.190	SM	616.5	17.9	-0.465	-
3	1952	305.9	16.7	2.234	SS	364.8	15.9	1.068	SM	379.6	17.0	-0.250	-
4	1953	453.2	15.7	-1.100	-	441.7	15.6	-0.011	-	609.5	17.1	-1.531	-
5	1954	292.4	16.5	1.920	SM	284.2	16.2	2.174	SS	762.5	19.3	0.575	SL
6	1955	467.6	16.0	-0.581	-	584.7	15.8	-0.750	-	880.9	19.3	-0.156	-
7	1956	281.2	15.8	0.524	SL	389.7	16.0	1.048	SM	730.8	18.5	-0.338	-
8	1957	278.3	16.2	1.398	SM	252.1	16.6	3.084	SE	530.5	19.0	1.591	SM
9	1958	807.3	15.5	-4.433	-	682.7	15.7	-1.653	-	977.9	17.7	-2.972	-
10	1959	595.5	15.7	-2.269	-	481.5	15.9	0.192	SL	509.0	20.1	3.248	SE
11	1960	306.9	16.2	1.163	SM	321.8	16.4	2.226	SS	480.8	19.0	1.897	SM
12	1961	412.8	16.2	0.294	SL	334.7	16.5	2.297	SS	850.6	19.0	-0.385	-
13	1962	310.4	16.6	1.985	SM	309.4	16.8	2.988	SS	697.6	19.1	0.698	SL
14	1963	434.2	16.8	1.393	SM	326.3	16.5	2.360	SS	1001.3	18.4	-2.146	-
15	1964	470.3	16.3	0.034	SL	447.7	15.7	0.111	SL	739.7	18.1	-0.948	-
16	1965	435.3	15.9	-0.528	-	510.9	15.6	-0.530	-	784.4	18.4	-0.808	-
17	1966	478.8	15.9	-0.886	-	514.3	15.3	-1.057	-	739.7	18.3	-0.671	-
18	1967	455.2	16.0	-0.479	-	590.9	15.7	-0.964	-	1049.0	19.0	-1.609	-
19	1968	463.0	15.3	-2.031	-	635.1	14.7	-2.967	-	681.7	18.4	-0.174	-
20	1969	241.9	16.5	2.335	SS	169.3	15.2	1.366	SM	550.2	19.1	1.608	SM
21	1970	524.7	15.7	-1.687	-	549.4	15.2	-1.488	-	811.7	19.2	0.133	SL
22	1971	508.1	16.1	-0.701	-	764.3	15.5	-2.600	-	856.8	18.8	-0.700	-
23	1972	344.4	16.5	1.493	SM	414.4	15.9	0.696	SL	712.4	19.6	1.300	SM
24	1973	762.9	15.4	-4.281	-	521.7	15.5	-0.778	-	888.0	19.0	-0.615	-
25	1974	286.9	16.0	0.903	SL	415.9	15.6	0.183	SL	723.2	19.0	0.402	SL
26	1975	412.0	15.4	-1.400	-	367.6	15.5	0.378	SL	643.9	18.6	0.337	SL
27	1976	565.9	15.0	-3.513	-	570.0	14.8	-2.311	-	808.5	18.5	-0.818	-
28	1977	314.0	15.7	0.043	SL	405.7	15.4	-0.075	-	799.7	18.7	-0.486	-
29	1978	285.3	16.2	1.341	SM	278.3	15.4	0.882	SL	696.7	19.1	0.704	SL
30	1979	294.4	15.9	0.629	SL	300.1	15.6	1.052	SM	541.2	19.1	1.663	SM
31	1980	418.4	16.5	0.885	SL	377.0	15.6	0.475	SL	780.1	19.6	0.882	SL
32	1981	429.6	16.5	0.794	SL	588.5	15.4	-1.447	-	694.7	19.0	0.578	SL
33	1982	286.2	16.8	2.608	SS	299.6	16.3	2.226	SS	723.1	19.5	1.095	SM
34	1983	394.6	15.8	-0.407	-	533.0	14.9	-1.866	-	827.1	18.5	-0.933	-
35	1984	565.1	16.6	-0.107	-	560.1	15.4	-1.234	-	773.7	19.0	0.090	SL
36	1985	498.7	16.7	0.651	SL	542.0	14.2	-3.103	-	797.1	19.2	0.223	SL
37	1986	481.1	16.3	-0.054	-	511.3	14.8	-1.870	-	677.7	19.4	1.237	SM
38	1987	565.5	16.1	-1.172	-	632.6	14.6	-3.115	-	684.6	19.0	0.640	SL
39	1988	502.5	16.1	-0.655	-	489.7	14.9	-1.541	-	639.4	17.9	-0.606	-

• ISSN 0187-8336

Cuadro 3 (continuación). Datos y cálculos anuales de sequías con base en el *ISP* en las tres estaciones climatológicas indicadas del estado de Zacatecas, México.

Valores de		Leobardo Reynoso (El Sauz)				Zacatecas				Nochistlán			
PMA	***DEP***	**418.334 mm**		**121.793 mm**		**463.220 mm**		**133.206 mm**		**700.160 mm**		**162.052 mm**	
TMA	***DET***	**16.083 °C**		**0.471 °C**		**15.703 °C**		**0.598 °C**		**18.608 °C**		**0.721 °C**	
Núm.	**Año**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**	***PA***	***TM***	***ISP***	**TS**
40	1989	371.6	16.7	1.695	SM	412.8	15.3	-0.295	-	336.0	19.0	2.791	SS
41	1990	507.3	17.0	1.218	SM	721.4	14.9	-3.280	-	901.4	19.0	-0.698	-
42	1991	494.5	16.3	-0.164	-	669.6	15.2	-2.390	-	797.4	17.6	-1.997	-
43	1992	413.7	15.8	-0.564	-	537.1	14.9	-1.897	-	1117.5	17.2	-4.527	-
44	1993	347.2	16.6	1.683	SM	468.3	15.5	-0.377	-	704.8	17.7	-1.287	-
45	1994	333.1	17.0	2.648	SS	554.1	16.1	-0.019	-	579.0	18.3	0.321	SL
46	1995	380.3	16.5	1.198	SM	342.8	15.9	1.233	SM	806.0	18.0	-1.496	-
47	1996	446.4	15.9	-0.619	-	568.8	15.6	-0.965	-	571.4	17.6	-0.602	-
48	1997	310.0	15.5	-0.350	-	354.0	14.9	-0.522	-	810.6	19.0	-0.138	-
49	1998	299.4	16.6	2.075	SS	473.0	16.6	1.425	SM	497.3	19.0	1.796	SM
50	1999	250.2	15.8	0.779	SL	343.5	16.0	1.395	SM	415.1	17.7	0.501	SL
51	2000	306.4	16.0	0.743	SL	339.0	16.1	1.596	SM	532.3	16.8	-1.470	-
52	2001	285.8	15.6	0.062	SL	481.9	15.5	-0.480	-	409.0	17.6	0.400	SL
53	2002	537.7	16.2	-0.732	-	693.3	15.7	-1.732	-	868.1	17.5	-2.572	-
54	2003	475.3	16.0	-0.644	-	559.9	15.7	-0.731	-	769.4	18.4	-0.715	-
55	2004	540.9	15.5	-2.245	-	718.3	15.9	-1.586	-	904.9	19.0	-0.720	-
56	2005	380.0	16.3	0.776	SL	358.7	16.7	2.451	SS	415.1	19.8	3.412	SE
57	2006	442.7	15.9	-0.589	-	520.3	16.8	1.404	SM	634.8	19.0	0.947	SL
58	2007	399.2	15.6	-0.869	-	408.8	16.2	1.239	SM	742.6	18.6	-0.273	-
59	2008	643.3	15.3	-3.511	-	591.3	15.7	-0.967	-	705.0	19.0	0.514	SL
60	2009	386.5	16.0	0.085	SL	502.9	16.4	0.867	SL	524.4	19.1	1.767	SM
61	2010	346.9	15.1	-1.503	-	493.0	15.5	-0.563	-	575.4	17.9	-0.211	-
62	2011	183.5	16.2	2.177	SS	245.5	15.6	1.462	SM	493.9	19.1	1.955	SM
63	2012	301.2	16.0	0.785	SL	216.0	15.3	1.182	SM	675.0	19.0	0.699	SL
64	2013	640.2	15.9	-2.211	-	487.6	16.8	1.650	SM	695.2	18.7	0.159	SL
65	2014	409.0	15.6	-0.950	-	450.1	16.4	1.263	SM	722.1	17.6	-1.532	-
Sumas		-	-	-	34	-	-	-	32	-	-	-	32

Simbología:

PMA precipitación media anual en milímetros.
DEP desviación estándar de la precipitación en milímetros.
TMA temperatura media promedio anual en °C.
DET desviación estándar de la *TM* en milímetros.
PA precipitación anual en milímetros.
TM temperatura media del año en °C.
ISP índice de sequías de Pedj adimensional.
TS tipo de sequía (SL, leve; SM, moderada; SS, severa; SE, extrema).

En la figura 2 se muestra la serie cronológica del *ISP* anual de la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador en barras y su curva de promedios móviles de orden 5. Esta estación resultó no homogénea según las pruebas básicas; tiene persistencia y tendencia lineal ascendente, con pendiente estadísticamente diferente de cero según prueba de la *t* de Student (Campos-Aranda, 2015), ya que $t = 2.462$ y $t_c = 1.998$. En la figura 3 se expone la serie cronológica del *ISP* anual de la estación Nochistlán, que resultó homogénea.

ISSN 0187-8336 •

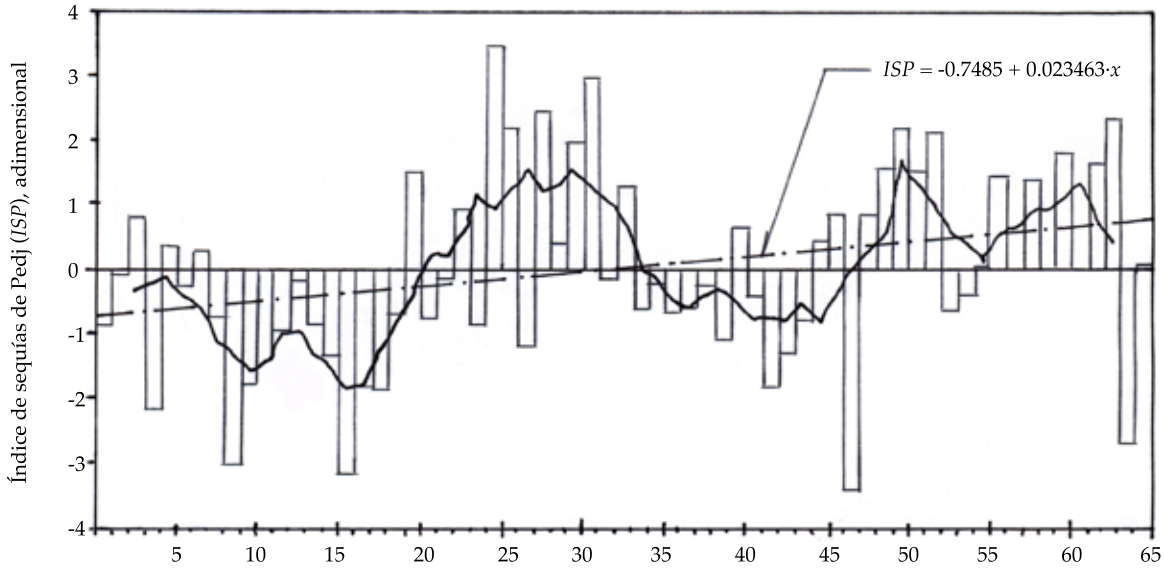

Figura 2. Serie cronológica del índice de sequías de Pedj (*ISP*) en barras, curva de promedios móviles de orden 5 y recta de tendencia en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

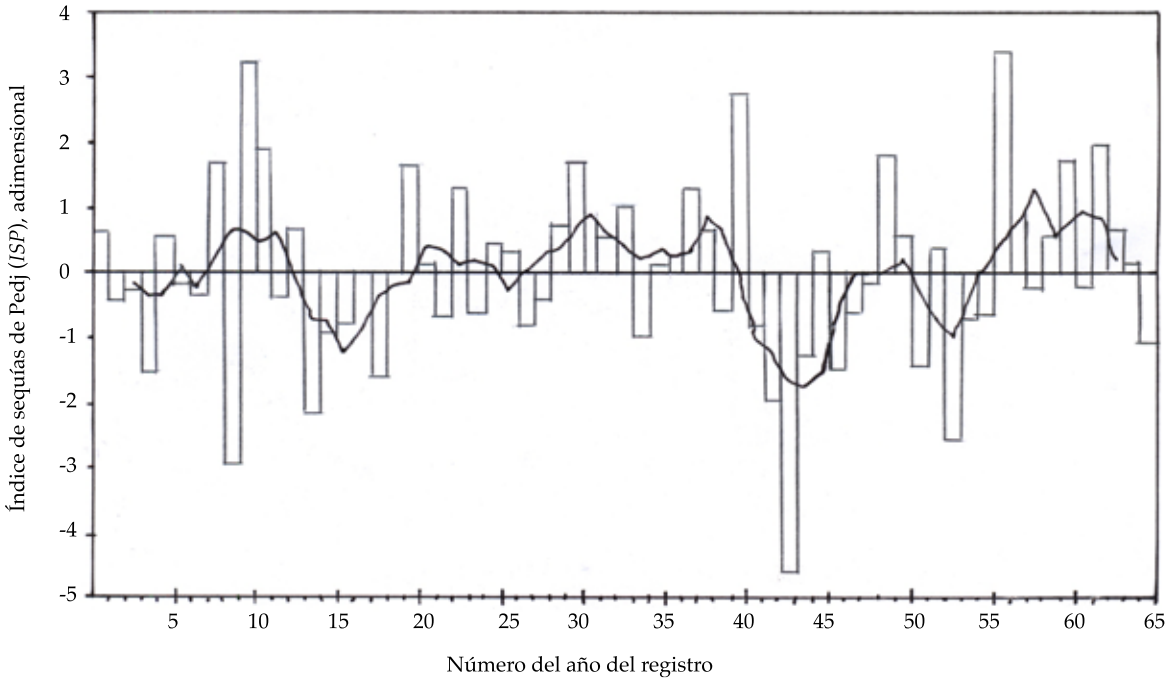

Figura 3. Serie cronológica del índice de sequías de Pedj en barras y curva de promedios móviles de orden 5 en la estación climatológica Nochistlán del estado de Zacatecas, México.

• ISSN 0187-8336

Verificación de la homogeneidad

A cada serie cronológica del *ISP* anual se le realizó un análisis de calidad estadística, buscando componentes determinísticas con tres pruebas generales (test de Helmert, Secuencias y Von Neumann) y seis específicas: dos de persistencia (Anderson y Sneyers), dos de tendencia (Kendall y Spearman), una de variabilidad (Bartlett) y una de cambio en la media (Cramer). La mayoría de estas pruebas se puede consultar en WMO (1971), Machiwal y Jha (2008, 2012), y Campos-Aranda (2015). En el cuadro 4 se concentraron los resultados de tales pruebas; se observa que sólo cuatro registros son perfectamente homogéneos, tres muestran tendencia descendente y uno ascendente, y el resto presenta persistencia, que es en realidad una característica estadística de la mayoría de las series cronológicas de lluvia y temperatura anuales. Se detecta del cuadro 4 que la persistencia está asociada con el valor de coeficiente de correlación serial de orden uno (r_1), cuando éste es mayor de 0.200.

Análisis regional: evidencia del cambio climático

De acuerdo con los resultados del cuadro 4, exclusivamente seis series del *ISP* son homogéneas; el resto presenta persistencia, y cuatro de ellas muestran tendencia: tres descendente y una ascendente. Por anterior, es conveniente buscar evidencia de cambio climático. Para ello, por simplicidad, se dividió el registro en dos periodos: de 1950 a 1981, y de 1982 a 2014, pues tal búsqueda se hizo por conteo de ocurrencias de sequías importantes. En seguida, se contabilizaron por estación y periodo los años con sequías moderadas, severas y extremas ($ISP \geq 1.000$). Los resultados se muestran en el cuadro 5.

Se deduce del cuadro 5 que los indicadores de sumas de sequías importantes ($ISP \geq 1.000$) por zonas deben ser considerados similares, pues aunque existen diferencias, éstas no fueron originadas por todas las estaciones de cada región, sino que unas estaciones presentan

Cuadro 4. Coeficiente de correlación serial de orden uno (r_1) y resultados de las pruebas de homogeneidad en las 16 series anuales del índice de sequías de Pedj (*ISP*) procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	r_1	Resultados de las pruebas de homogeneidad
1	Cañitas de Felipe Pescador	0.262	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia ascendente
2	Río Grande	0.044	Homogénea
3	Fresnillo	0.291	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
4	Leobardo Reynoso	0.029	Homogénea
5	Villa de Cos	0.222	Homogénea, muestra persistencia
6	Santa Rosa	0.209	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente
7	San Pedro Piedra Gorda	0.358	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
8	Villa García	0.169	No homogénea, según pruebas básicas
9	Pinos	0.405	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
10	Zacatecas	0.335	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
11	Villanueva	0.224	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente ligera
12	Presa El Chique	0.354	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
13	Juchipila	0.321	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente
14	Nochistlán	0.071	Homogénea
15	Tlaltenango	0.324	Homogénea, muestra persistencia
16	Excamé	0.102	Homogénea

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 5. Número de sequías importantes (*ISP* ≥ 1.00) en cada estación climatológica procesada en el periodo indicado.

Periodo	Estaciones de la zona norte						Suma norte	Estaciones de la zona centro					Suma centro	Estaciones de la zona sur					Suma sur
	1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11		12	13	14	15	16	
1950-1981	6	8	5	11	7	11	48	8	11	7	12	11	49	4	10	8	6	10	38
1982-2014	10	9	8	8	6	11	52	10	8	11	12	7	48	12	2	5	7	6	32

más sequías en el primer periodo y otras en el segundo; por ejemplo, las estaciones 9 (Pinos) y 11 (Villanueva) de la zona centro. Además, en cada zona geográfica existen estaciones con número semejante de sequías por periodo, por ejemplo, las números 2, 5, 6, 10 y 15. Por lo tanto, no existe evidencia regional de cambio climático en las sequías meteorológicas anuales del estado de Zacatecas, México, de acuerdo con el *ISP*.

Análisis local: secuencias mínimas de cinco años

Con base en la técnica de promedios móviles de orden cinco, se identificaron en las 16 series cronológicas del *ISP* las tres secuencias mínimas, cuyos valores y ubicación se detallan en el cuadro 6. Las secuencias más extremas de la zona norte las definen las estaciones Fresnillo y Villa de Cos, ocurriendo en la primera en el lapso de 1979 a 1985 y en la segunda de 1960 a 1966. En la zona centro, en la estación Pinos, se presentaron las secuencias más severas en el periodo de 1999 a 2005, y por último, en la zona sur, las secuencias más extremas de cinco años ocurrieron en varias estaciones en el inicio de la década de 1950 y en el final del decenio de 1990, por ejemplo en la presa El Chique.

Análisis local: los diez años más secos

A partir de las series de valores *ISP* ordenados de mayor a menor se seleccionan los diez más grandes y se obtienen sus años de ocurrencia. Tales valores del *ISP* y sus años respectivos se han concentrado en el cuadro 7. En las series

Cuadro 6. Promedios y lapsos de las tres secuencias máximas de cinco años en las series cronológicas del *ISP* en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	Zona	Primera secuencia	Segunda secuencia	Tercera secuencia
1	Cañitas de Felipe Pescador	Norte	1.671 (1997-2001)	1.516 (1974-1978)	1.510 (1977-1981)
2	Río Grande	Norte	1.510 (2010-2014)	1.123 (2009-2013)	1.057 (1978-1982)
3	Fresnillo	Norte	2.525 (1981-1985)	2.064 (1980-1984)	1.862 (1979-1983)
4	Leobardo Reynoso	Norte	1.251 (1978-1982)	1.148 (1950-1954)	0.991 (1994-1998)
5	Villa de Cos	Norte	2.030 (1961-1965)	1.735 (1962-1966)	1.513 (1960-1964)
6	Santa Rosa	Norte	1.467 (1953-1957)	1.349 (1994-1998)	1.337 (1978-1982)
7	San Pedro Piedra Gorda	Centro	2.286 (1950-1954)	1.810 (1951-1955)	1.793 (2008-2012)
8	Villa García	Centro	1.349 (1961-1965)	1.345 (1962-1966)	1.194 (1978-1982)
9	Pinos	Centro	2.533 (2000-2004)	2.508 (2001-2005)	2.046 (1999-2003)
10	Zacatecas	Centro	2.012 (1959-1963)	1.996 (1960-1964)	1.445 (1961-1965)
11	Villanueva	Centro	1.811 (1978-1982)	1.519 (1979-1983)	1.429 (1977-1981)
12	Presa El Chique	Sur	1.961 (1953-1957)	1.867 (1996-2000)	1.749 (1997-2001)
13	Juchipila	Sur	1.445 (1953-1957)	1.429 (1950-1954)	1.344 (1965-1969)
14	Tlaltenango	Sur	1.806 (1961-1965)	1.651 (1960-1964)	1.220 (1998-2002)
15	Nochistlán	Sur	1.273 (2005-2009)	0.984 (1978-1982)	0.945 (2008-2012)
16	Excamé	Sur	2.061 (1950-1954)	1.554 (1951-1955)	1.177 (1953-1957)

• ISSN 0187-8336

de valores ordenados del *ISP* se detecta que el número de sequías (*ISP* > 0) varía de 29 en Cañitas de Felipe Pescador a 40 en Tlaltenango; el número de sequías extremas, severas y moderadas (*ISP* ≥ 1.0) varía de 12 en Juchipila a 24 en Zacatecas. Además, se observa en el cuadro 7 que los valores extremos máximos del *ISP* se presentan en Villa de Cos y Fresnillo, con 4.331 y 4.003, respectivamente; pero pueden ser tan bajos como 2.615 y 2.634, que ocurren en Tlaltenango y Villa García.

Análisis regional: estaciones climatológicas afectadas

Para obtener en cuáles años se presentó el mayor número de sequías más importantes o extremas (valores del cuadro 7), se realizó una tabulación

Cuadro 7. Valores de los diez mayores índices de sequía de Pedj (*ISP*) anuales y sus años respectivos en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Nombre	Dato	Valores máximos del *ISP* en orden decreciente de magnitud y sus años respectivos									
			10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Cañitas de Felipe Pescador	*ISP*	3.460	2.925	2.512	2.424	2.379	2.213	2.152	1.961	1.866	1.690
		Año	1974	1980	1975	1977	2012	1999	2001	1979	2009	2011
2	Río Grande	*ISP*	3.845	3.304	3.192	2.637	2.447	2.353	1.810	1.804	1.745	1.625
		Año	2011	1989	1982	2012	2014	1995	1977	1998	1957	1956
3	Fresnillo	*ISP*	4.003	3.066	2.608	2.446	2.142	1.837	1.729	1.279	1277	1.195
		Año	1982	2011	1981	1985	2012	1984	1983	1960	1964	1965
4	Leobardo Reynoso	*ISP*	2.648	2.608	2.335	2.234	2.177	2.075	1.985	1.920	1.695	1.683
		Año	1994	1982	1969	1952	2011	1998	1962	1954	1989	1993
5	Villa de Cos	*ISP*	4.331	2.418	2.348	2.050	2.001	1.587	1.465	1.440	1.358	1.338
		Año	1963	1964	1965	1954	1995	1989	1974	1998	1973	1956
6	Santa Rosa	*ISP*	2.730	2.626	2.429	2.303	2.125	2.087	1.986	1.882	1.846	1.819
		Año	1962	1957	2014	1956	1969	1996	1964	1994	1954	1950
7	San Pedro Piedra Gorda	*ISP*	2.793	2.766	2.674	2.660	2.523	2.444	2.074	1.869	1.787	1.684
		Año	1950	2011	1954	1969	1952	2009	1982	2012	1951	1979
8	Villa García	*ISP*	2.634	2.580	2.481	2.198	2.190	2.063	1.958	1.721	1.697	1.651
		Año	1954	1962	1965	2011	1982	1957	2009	2000	1969	1999
9	Pinos	*ISP*	3.503	3.488	2.784	2.776	2.316	2.272	2.232	1.953	1.735	1.486
		Año	1987	2001	2003	2004	2002	1962	1969	1977	1968	1954
10	Zacatecas	*ISP*	3.084	2.988	2.451	2.360	2.297	2.226	2.226	2.174	1.998	1.650
		Año	1957	1962	2005	1963	1961	1960	1982	1954	1950	2013
11	Villanueva	*ISP*	3.230	2.410	2.403	2.237	2.005	1.929	1.87	1.553	1.486	1.646
		Año	1969	1994	1982	1979	2012	2011	1963	1978	1981	1960
12	Presa El Chique	*ISP*	3.873	3.642	2.952	2.772	2.512	1.955	1.935	1.884	1.777	1.775
		Año	2011	1957	1953	1998	2009	2000	1961	1989	1999	1993
13	Juchipila	*ISP*	3.242	3.151	2.623	2.229	2.217	2.086	2.021	1.984	1.739	1.614
		Año	1957	1968	1994	2011	1956	1967	1952	1972	1950	1951
14	Tlaltenango	*ISP*	2.615	2.612	2.177	2.028	1.835	1.769	1.662	1.637	1.454	1.441
		Año	1962	1950	2011	1963	1972	1998	1964	2000	1965	1999
15	Nochistlán	*ISP*	3.412	3.248	2.791	1.955	1.897	1.796	1.767	1.663	1.608	1.591
		Año	2005	1959	1989	2011	1960	1998	2009	1979	1969	1957
16	Excamé	*ISP*	3.330	2.962	2.845	2.661	2.501	2.493	2.323	2.164	2.097	1.982
		Año	1994	1969	2011	1967	1957	1954	1951	1950	1952	1972

ISSN 0187-8336 •

por zona geográfica, con 65 renglones relativos a cada año del periodo analizado (1950-2014) y diez columnas para los órdenes de magnitud decrecientes (10, 9, . . . , 2, 1). Después, cada uno de los diez años de cada registro (cuadro 7) se llevó a la tabulación de su zona, marcando únicamente su ocurrencia en el renglón y columna que les corresponde; se sumaron los respectivos órdenes de magnitud y se designaron por SUM.

Los años con tres o más ocurrencias, es decir, estaciones climatológicas afectadas (ECA) con sequías más extremas, se citan en el cuadro 8. Se observa que exclusivamente la sequía del año 2011 abarcó las tres zonas geográficas. Por otra parte, en la zona norte, las sequías más extremas fueron las de 1982 y 2011, con SUM igual a 27 y 26, respectivamente. En cambio, en la zona centro, sus cinco años con sequías más extremas y frecuentes fueron de severidad similar. Finalmente, en la zona sur destacan los años 2011 y 1957 por su severidad, a través del valor de SUM. Del cuadro 8 se deduce que son más frecuentes las sequías en la zona norte.

Contraste con el RDI_{ST}

Como el índice de Pedj es uno de los primeros algoritmos de caracterización de sequías que emplean la precipitación y la temperatura media, se consideró conveniente contrastarlo con uno de los índices más recientes y simples que emplean la evapotranspiración potencial, además de la precipitación: el RDI_{ST}. Este contraste se basó en los porcentajes de cada tipo de sequía que definen ambos índices y en el número total de tales eventos (NTS), los cuales se han concentrado en el cuadro 9.

Con base en los resultados de las 16 series climáticas procesadas del estado de Zacatecas se observa que ambos índices presentan resultados fluctuantes; los del *ISP* varían notablemente en las sequías extremas y los RDI_{ST} en las severas. Respecto al NTS, que debe ser 32 o 33, el índice RDI_{ST} subestima en general tal valor y el *ISP* es más aproximado; ambos índices sobreestiman tal magnitud en la estación Tlaltenango. En el cuadro 10 se exponen los resultados *anuales* de ambos índices para su contraste en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador, una de las más discordantes entre ellos, según se observa o deduce del cuadro 9. En el cuadro 10 se observa que ambos índices detectan 22 años comunes con sequía de los 29 que tienen en total (cuadro 9) y de ellos, los 10 años siguientes coinciden en el tipo de sequía identificado: 1954, 1956, 1969, 1972, 1975, 1980, 1995, 1997, 1999 y 2010.

Conclusiones

El *índice de sequías de Pedj* (*ISP*), basado en la diferencia de las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales, es una técnica bastante simple, que permite la detección a nivel local y regional de las sequías meteorológicas anuales, cuando tales

Cuadro 8. Años de sequías importantes con tres o más estaciones climatológicas afectadas (ECA) por zonas geográficas en el estado de Zacatecas, México.

Zona norte (EC = 6)			Zona centro (EC = 5)			Zona sur (EC = 5)		
Año	**ECA**	**SUM**	**Año**	**ECA**	**SUM**	**Año**	**ECA**	**SUM**
1954	3	12	1954	4	22	1950	3	14
1956	3	9	1962	3	23	1957	4	26
1964	3	15	1969	4	23	1972	3	10
1982	3	27	1982	4	22	1998	3	17
1989	3	16	2011	3	21	2011	5	40
1998	3	11	-	-	-	-	-	-
2011	4	26	-	-	-	-	-	-
2012	3	19	-	-	-	-	-	-

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 135-149
• ISSN 0187-8336

Cuadro 9. Porcentajes de los tipos de sequías y número total, estimados con el índice de Pedj y con el RDI_{ST} en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	Zona	Estimación con Índice de Sequías de Pedj					Estimación con el RDI_{ST}				
			%SL	%SM	%SS	%SE	NTS	%SL	%SM	%SS	%SE	NTS
1	Cañitas de Felipe Pescador	Norte	44.8	31.0	20.7	3.4	29	62.1	13.8	20.7	3.4	29
2	Río Grande	Norte	43.3	36.7	10.0	10.0	30	68.8	18.8	3.1	9.4	32
3	Fresnillo	Norte	62.9	22.9	8.6	5.7	35	66.7	16.7	10.0	6.7	30
4	Leobardo Reynoso	Norte	44.1	38.2	17.6	0.0	34	58.6	31.0	6.9	3.4	29
5	Villa de Cos	Norte	62.9	22.9	11.4	2.9	35	74.2	12.9	9.7	3.2	31
6	Santa Rosa	Norte	26.7	53.3	20.0	0.0	30	68.8	15.6	9.4	6.3	32
7	San Pedro Piedra Gorda	Centro	45.5	33.3	21.2	0.0	33	60.7	21.4	7.1	10.7	28
8	Villa García	Centro	42.4	39.4	18.2	0.0	33	57.1	21.4	14.3	7.1	28
9	Pinos	Centro	48.6	31.4	14.3	5.7	35	64.5	16.1	9.7	9.7	31
10	Zacatecas	Centro	25.0	50.0	21.9	3.1	32	62.1	24.1	6.9	6.9	29
11	Villanueva	Centro	40.0	43.3	13.3	3.3	30	62.1	17.2	10.3	10.3	29
12	Presa El Chique	Sur	50.0	34.4	9.4	6.3	32	65.5	20.7	3.4	10.3	29
13	Juchipila	Sur	57.1	17.9	17.9	7.1	28	69.2	19.2	0.0	11.5	26
14	Tlaltenango	Sur	67.5	22.5	10.0	0.0	40	77.1	8.6	8.6	5.7	35
15	Nochistlán	Sur	59.4	31.3	3.1	6.3	32	57.7	23.1	7.7	11.5	26
16	Excamé	Sur	50.0	21.9	25.0	3.1	32	66.7	14.8	7.4	11.1	27
		Valores mínimos	25.0	17.9	3.1	0.0	28	57.1	8.6	0.0	3.2	26
		Valores máximos	67.5	53.3	25.0	10.0	40	77.1	31.0	20.7	11.5	35

Simbología:

%SL porcentaje de sequías leves.
%SM porcentaje de sequía moderadas.
%SS porcentaje de sequías severas.
%SE porcentaje de sequías extremas.
NTS número total de sequías.

Cuadro 10. Valores anuales de los índices de Pedj y RDI_{ST} y de sus tipos de sequía (TS) en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador				Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador			
		ISP	TS	RDI_{ST}	TS			*ISP*	TS	RDI_{ST}	TS
1	1950	-0.830		0.526		34	1983	-0.613		0.484	
2	1951	-0.106		-0.203	SL	35	1984	-0.245		-0.350	SL
3	1952	0.824	SL	-1.557	SS	36	1985	-0.693		0.322	
4	1953	-2.123		1.486		37	1986	-0.692		0.060	
5	1954	0.383	SL	-0.834	SL	38	1987	-0.289		0.178	
6	1955	-0.283		-0.007	SL	39	1988	-1.042		0.564	
7	1956	0.308	SL	-0.727	SL	40	1989	0.666	SL	-1.128	SM
8	1957	-0.735		-1.501	SS	41	1990	-0.426		0.391	
9	1958	-3.063		1.570		42	1991	-1.812		0.988	
10	1959	-1.781		1.027		43	1992	-1.289		0.233	
11	1960	-1.399		0.077		44	1993	-0.789		-0.220	SL
12	1961	-0.934		-0.152	SL	45	1994	0.430	SL	0.061	
13	1962	-0.153		-0.827	SL	46	1995	0.898	SL	-0.357	SL

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 10 (continuación). Valores anuales de los índices de Pedj y RDI_{ST} y de sus tipos de sequía (TS) en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador				Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador			
		ISP	TS	RDI_{ST}	TS			*ISP*	TS	RDI_{ST}	TS
14	1963	-0.870		0.486		47	1996	-3.415		2.507	
15	1964	-1.351		0.459		48	1997	0.874	SL	-0.656	SL
16	1965	-3.182		1.543		49	1998	1.581	SM	0.118	
17	1966	-1.847		0.601		50	1999	2.213	SS	-1.800	SS
18	1967	-1.860		1.024		51	2000	1.533	SM	-0.186	SL
19	1968	-0.673		0.384		52	2001	2.152	SS	-1.364	SM
20	1969	1.525	SM	-1.217	SM	53	2002	-0.584		1.436	
21	1970	-0.784		0.633		54	2003	-0.373		1.199	
22	1971	-0.129		0.580		55	2004	0.050	SL	0.572	
23	1972	0.973	SL	-0.555	SL	56	2005	1.043	SM	0.053	
24	1973	-0.876		1.149		57	2006	0.633	SL	0.580	
25	1974	3.460	SE	-1.603	SS	58	2007	1.415	SM	-0.671	SL
26	1975	2.512	SS	-1.680	SS	59	2008	-0.014		0.626	
27	1976	-1.214		1.097		60	2009	1.866	SM	-0.572	SL
28	1977	2.424	SS	-1.089	SM	61	2010	0.813	SL	-0.815	SL
29	1978	0.400	SL	1.067		62	2011	1.690	SM	-2.233	SE
30	1979	1.961	SM	-0.932	SL	63	2012	2.379	SS	-0.776	SL
31	1980	2.925	SS	-1.778	SS	64	2013	-2.652		1.614	
32	1981	-0.160		0.383		65	2014	0.061	SL	0.336	
33	1982	1.290	SM	-0.623	SL	-	-	-	-	-	-

Simbología:
TS, tipo de sequía: SL, leve; SM, moderada; SS, severa; SE, extrema.

series se analizan en un *periodo común*. Para el caso expuesto, del estado de Zacatecas, México, se procesaron 16 series del *ISP* con 65 años, durante el lapso común de 1950 a 2014, integradas en tres zonas geográficas: norte, centro y sur.

La detección *local* de las sequías se ilustró en el cuadro 3; en cambio, los resultados *regionales* mostraron que los años con tres o más estaciones climatológicas afectadas, según resultados del cuadro 8, fueron: 1950, 1954, 1956, 1957, 1962, 1964, 1969, 1972, 1982, 1989, 1998, 2011 y 2012. Sólo la sequía del año 2011 tuvo presencia generalizada e importante.

Debido a la sencillez que presenta el cálculo de las series del *ISP* y a la importancia implícita de los resultados de los análisis local y regional para la detección y el seguimiento de las sequías meteorológicas anuales se recomienda su aplicación sistemática. Lo anterior permitirá verificar los resultados de otros índices de sequías, como se mostró en el inciso relativo al contraste entre el *ISP* y el RDI_{ST}; además, hará posible ampliar el entendimiento sobre el comportamiento de las sequías como serie cronológica, orientado esto último a su pronóstico (Mishra & Singh, 2011).

Agradecimientos

Se reconoce la excelente disposición del ingeniero Humberto Abelardo Díaz Valdéz de la Dirección Local Zacatecas de la Conagua, para proporcionar al autor la actualización de la información climatológica procesada.

Se agradecen los comentarios y sugerencias de los árbitros anónimos 1 y 2. Las correcciones del primero mejoraron la presentación de resultados y ayudaron a su interpretación; la sugerencia del segundo árbitro permitió el contraste con el RDI_{ST}.

• ISSN 0187-8336

Referencias

Almanza, R., & López, S. (1975). *Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación* (20 pp.). Series del Instituto de Ingeniería 357. México, DF: UNAM.

Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación de la evapotranspiración. Capítulo 3 (pp. 65-96). En: *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México, DF: Editorial Trillas.

Campos-Aranda, D. F. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas. *Agrociencia*, *48*(5), 463-476.

Campos-Aranda, D. F. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, *16*(3), 357-370.

Elagib, N. A., & Elhag, M. M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, *409*(3-4), 612-625.

Gruza, G., Rankova, E., Razuvaev, V., & Bulygina, O. (1999). Indicators of climate change for the Russian Federation. *Climatic Change*, *42*(1), 219-242.

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *108*(IR3), 225-230.

Kunkel, K. E., Pielke, R. A., & Changnon, S. A. (1999). Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *80*(6), 1077-1098.

Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 197-211.

Machiwal, D., & Jha, M. K. (2008). Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, *53*(2), 353-366.

Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). Methods for time series analysis (Chapter 4, pp. 51-84). In: *Hydrologic time series analysis: Theory and practice*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Mawdsley, J., Petts, G., & Walker, S. (1994). *Assessment of drought severity* (41 pp.). Occasional Paper No. 3. London: British Hydrological Society.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, *391*(1-2), 202-216.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling-A review. *Journal of Hydrology*, *403*(1-2), 157-175.

Potop, V., & Soukup, J. (2009). Spatiotemporal characteristics of dryness and drought in the Republic of Moldova. *Theoretical and Applied Climatology*, *96*(3-4), 305-318.

Qian, W., & Zhu, Y. (2001). Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental conditions. *Climatic Change*, *50*(4), 419-444.

Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, *9/10*, 3-11.

Tsakiris, G., Tigkas, D., Vangelis, H., & Pangalou, D. (2007). Regional drought identification and assessment. Chapter 9 (pp. 169-191). In: *Methods and tools for drought analysis and management*. Rossi, G., Vega, T., & Bonaccorso, B. (eds.). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

WMO (1971). Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations (Annexed III, pp. 58-71). In *Climatic Change*. Technical Note No. 79, WMO-No. 195. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.

Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos Aranda

Profesor jubilado
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Genaro Codina # 240, Col. Jardines del Estadio
78280 San Luis Potosí, S.L.P., México
campos_aranda@hotmail.com

ISSN 0187-8336 •